

BASE DE DATOS DE MEDICIONES DE RESPUESTAS IMPULSIVAS DE RECINTOS CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS

**Gabriel A. Cravero^a, Sebastián P. Ferreyra^a, Oscar Ramos^{a,b} Fabián Tommasini^{a,b}
and Mariano Araneda^a**

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN, FRC). Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, X5016ZAA Córdoba, Argentina
e-mails sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Miembro del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

Palabras clave: respuesta impulsiva, reverberación, resonancia, realidad acústica virtual.

Resumen. La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) engloba la característica de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, asumiendo que el sistema es lineal e invariante en el tiempo. La respuesta impulsiva es diferente para cada ubicación de la dupla fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros factores. En la actualidad el conocimiento de la RIR resulta imprescindible para el análisis y diseño de diversos recintos tales como salas de concierto, teatros, auditorios, salones de usos múltiples, ambientes industriales, oficinas, bibliotecas, ambientes especiales (cámara anecoica y reverberante). La identificación de anomalías acústicas como ecos flotantes, resonancias, excesiva reverberación y otras, se realiza a través del análisis de la RIR. La medición de la RIR resulta útil también, para validar programas de simulación que se utilizan como herramientas de diseño y sistemas de realidad acústica virtual. Actualmente existen varios métodos de medición de la RIR, siendo la ISO 3382 la norma de referencia que establece las directrices para realizar dichas mediciones.

En este trabajo se presentan los resultados de un conjunto de mediciones de RIR de espacios arquitectónicos con diferentes características acústicas, efectuadas según norma ISO 3382. El propósito es difundir los resultados de dichas mediciones realizadas por el CINTRA con motivo de iniciar la construcción de una base de datos a nivel nacional e internacional que permita profundizar la investigación científica en temas referidos a la propagación de sonido en recintos, modos normales de recintos, simulación acústica de recintos, realidad acústica virtual, diseño acústico arquitectónico, técnicas y métodos de medición en acústica de salas, entre otros.

1 INTRODUCCIÓN

La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) engloba la característica de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, asumiendo que el sistema es lineal e invariante en el tiempo. La RIR es diferente para cada ubicación de la combinación fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros factores. En la actualidad el conocimiento de la RIR resulta imprescindible para el análisis y diseño de diversos recintos tales como salas de concierto, teatros, auditorios, salones de usos múltiples, aulas, ambientes industriales, oficinas, bibliotecas, ambientes especiales (cámara anecóica y reverberante).

La identificación de anomalías acústicas como ecos flotantes, resonancias, excesiva reverberación y otras, se realiza a través del análisis de la RIR. La medición de la RIR resulta útil también, para validar programas de simulación que se utilizan como herramientas de diseño y sistemas de realidad acústica virtual. En la actualidad existen varios métodos de medición de la RIR, siendo a nivel internacional la norma ISO 3382 el documento que establece las directrices para realizar dichas mediciones. En el orden nacional, se está trabajando actualmente en el desarrollo la norma IRAM 4109, equivalente a la ISO 3382.

Durante los últimos 15 años, numerosas investigaciones demostraron que existen significativas discrepancias en algunos indicadores según el método y técnica de medición empleado (Vorländer 1994, Ferreyra 2006). Además, la segunda versión de la norma ISO 3382:1997 recibió numerosas críticas por no adaptarse a diferentes tipos de recintos y por poseer escasas especificaciones técnicas sobre procedimientos de medición para casos particulares. A fines de 2008, se aprobó la tercera versión de la norma ISO 3382 denominada “*Acoustics – Measurements of room acoustics parameters*”, la cual está dividida en tres secciones: *Part 1: Performance spaces*, con tres anexos A, B y C (ISO 3382-1:2009). *Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*, con tres anexos A, B y C (ISO 3382-2:2008).” (ISO/CD 3382-3), en desarrollo.

Actualmente, las mediciones de respuestas impulsivas de recintos se realizan con sistemas de medición diseñados específicamente para ésta aplicación (Ferreyra 2009), dichos sistemas cumplimentan los requerimientos especificados en la norma ISO 3382. Las nuevas tecnologías electrónicas digitales y analógicas han permitido optimizar numerosos equipos y dispositivos que componen la cadena de medición, mejorando características como resolución, relación señal ruido, respuesta en frecuencia e inmunidad a ruidos entre otros.

En este trabajo se presentan los resultados de un conjunto de mediciones de RIR de espacios arquitectónicos con diferentes características acústicas, efectuadas según norma ISO 3382. El propósito es difundir los resultados de dichas mediciones realizadas por el CINTRA con motivo de iniciar la construcción de una base de datos a nivel nacional e internacional que permita profundizar la investigación científica en temas referidos a la propagación de sonido en recintos, modos normales de recintos, simulación acústica de recintos, realidad acústica virtual, diseño acústico arquitectónico, técnicas y métodos de medición en acústica de salas, entre otros.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En el punto 2, se presentan los recintos medidos; en el punto 3, se describe la metodología de medición aplicada; en el punto 4, se muestran los valores promedio de los parámetros acústicos de recintos derivados de las mediciones; en el punto 5, se presentan las espectrometrías de RIR en posiciones específicas y finalmente en el punto 6, las conclusiones junto al trabajo a futuro.

2 RECINTOS

En la Tabla 1, se listan los recintos especificando código de identificación, localidad y fecha de medición; en Tabla 2, se especifica geometría y dimensiones; en Tabla 3 coordenadas de posiciones fuente—micrófono seleccionadas para espectrometrías. Seguidamente, se describen las principales características arquitectónicas, acompañadas de modelos computacionales simplificados (medidas en m) y fotografías.

| Código | Recinto | Localidad | Fecha de Medición |
|--------|--|-------------------------|-------------------|
| 1 | Aula 311 UTN FRC | Ciudad de Córdoba | 20/11/2007 |
| 2 | Parroquia Sagrado Corazón de Jesús | Ciudad de Córdoba | 07/07/2006 |
| 3 | S.U.M Colegio Dr. Antonio Nores | Ciudad de Córdoba | 09/05/2008 |
| 4 | S.U.M Colegio de San José | Ciudad de Córdoba | 22/04/2010 |
| 5 | S.U.M Cooperativa Eléctrica Arroyo Algodón | Arroyo Algodón, Córdoba | 11/05/2007 |
| 6 | S.U.M Comedor Universitario | Ciudad de Córdoba | 04/06/2011 |
| 7 | S.U.M Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba | Ciudad de Córdoba | 27/05/2004 |
| 8 | S.U.M Escuela Dr. Domingo Cabred | Ciudad de Córdoba | 28/10/2005 |
| 9 | S.U.M Sala del Rey | Ciudad de Córdoba | 27/10/2005 |
| 10 | Aula Magna UTN FRC | Ciudad de Córdoba | 24/10/2005 |

Tabla 1: Recintos, código de identificación, localidad y año de medición.

| Código | Geometría | Volumen [m ³] | Superficie Cubierta [m ²] | Largo [m] | Ancho [m] | Alto [m] | Superficie Total Interior [m ²] |
|--------|----------------------------|-------------------------------|--|----------------|----------------|---------------|--|
| 1 | paralelepípedo cuadrado | 118 | 39 | 6,9 | 5,7 | 3,0 | 193 |
| 2 | paralelepípedo en cruz | 16058 | 682 | 41,5* | 33,0* | 18* | 2198 |
| 3 | paralelepípedo rectangular | 18703 | 1900 | 50,0 | 38,0* | 11,0 | 5510 |
| 4 | paralelepípedo rectangular | 14650 | 1372 | 46,2 | 29,7 | 10,6** | 4655 |
| 5 | paralelepípedo rectangular | 8200 | 1000 | 50,0 | 20,0 | 8,2 | 3148 |
| 6 | paralelepípedo rectangular | 9596 | 1476 | 79,8 | 18,5 | 6,5** | 4230 |
| 7 | paralelepípedo rectangular | 66766 | 4769 | 100,4 | 47,5 | 14,0 | 13679 |
| 8 | paralelepípedo cuadrado | 1165 | 219 | 15,0 | 14,6 | 5,32** | 753 |
| 9 | paralelepípedo rectangular | 3360 | 420 | 35,0 | 12,0 | 8,0 | 1592 |
| 10 | paralelepípedo rectangular | 540 | 180 | 18,0 | 10,0 | 3,0 | 528 |

(*): Dimensiones máximas; (**): Altura media;

Tabla 2: Geometría y dimensiones de los recintos

| Código | Combinación FSO—M | Posición | Coord. X [m] | Coord. Y [m] | Coord. Z [m] |
|--------|-------------------|----------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | FSO1-M5 | FSO1 | 2,63 | 0,95 | 1,50 |
| | | M5 | 2,88 | 4,05 | 1,20 |
| 2 | FSO1-M2 | FSO1 | 30,00 | 6,50 | 2,00 |
| | | M2 | 24,00 | 6,50 | 1,70 |
| 3 | FSO1-M3 | FSO1 | 24,00 | 39,00 | 1,80 |
| | | M3 | 24,00 | 27,00 | 1,20 |
| 4 | FSO1-M3 | FSO1 | 13,50 | 5,00 | 2,98 |
| | | M3 | 13,50 | 21,00 | 1,70 |
| 5 | FSO1-M2 | FSO1 | 12,00 | 10,00 | 1,60 |
| | | M2 | 10,00 | 26,00 | 1,30 |
| 6 | FSO1-M2 | FSO1 | 10,00 | 13,18 | 1,78 |
| | | M2 | 10,00 | 19,18 | 1,50 |

Tabla 3: Coordenadas de posiciones fuente—micrófono (FSO-M) seleccionadas para espectrometrías

2.1 Aula 311 UTN FRC: recinto cerrado de base cuadrada y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Las paredes son de ladrillo macizo de barro cocido de 0,15 m de espesor con revoque de cemento terminados con pintura. Uno de los muros transversales presenta pizarrón de vidrio de 2 m por 1,5 m y puerta placa de madera como ingreso al recinto. El otro muro trasversal, posee aberturas de carpintería de chapa con paños de vidrio móvil de 4 mm de espesor, y 1,6 m de altura, ocupando todo el largo del muro. El techo, de geometría rectangular y disposición horizontal, es de losa de hormigón de aproximadamente 0,20 m de espesor recubierto interiormente con revoque de cemento. El piso es de baldosa cerámica. En la figura 1, se observan fotografías del recinto.

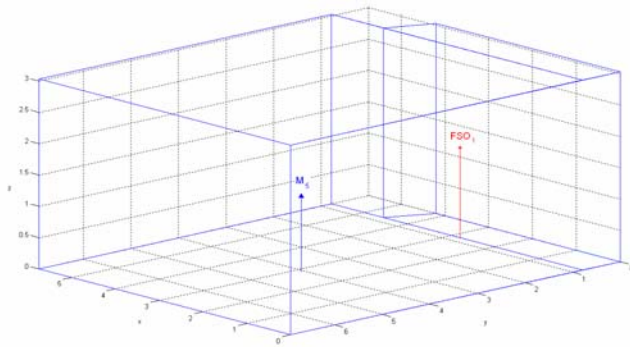


Figura 1: Aula 311 UTN FRC: a) modelo computacional; b) fotografía del interior del recinto.

2.2 Parroquia Sagrado Corazón de Jesús “Padres Capuchinos” Córdoba: recinto cerrado de base con forma de cruz y geometría interior irregular ó libre (múltiples cúpulas, típicas del estilo gótico). La parroquia está compuesta por un hall de ingreso, una nave central y dos laterales en sentido longitudinal, dos naves laterales en sentido transversal y el altar de planta con forma de semicircunferencia. Los muros perimetrales son de ladrillo macizo y cemento con un espesor total de 0,45 m de espesor, interiormente están terminados con revoque de cemento, mármol, yeso y pintura. Las puertas y los bancos son de madera maciza. En la figura 2, se observan fotografías del recinto.

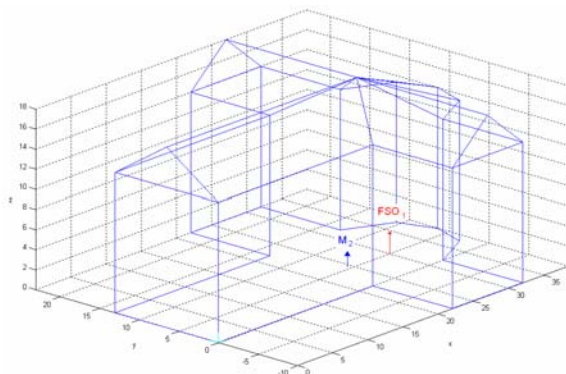
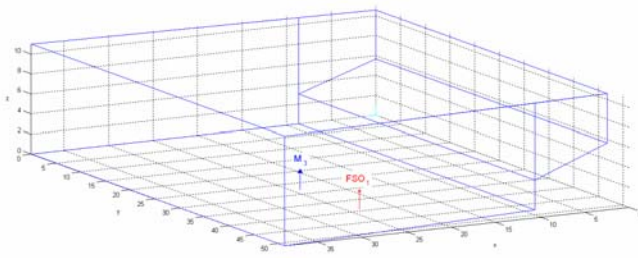


Figura 2: Parroquia Sagrado Corazón de Jesús “Padres Capuchinos”, Córdoba: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto (nave central).

2.3 S.U.M. Colegio Dr. Antonio Nores: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros perimetrales son de hormigón de 0,15 m de espesor mas revoque cementicio de 20 mm de espesor. Las aberturas son de carpintería metálica con paños de vidrio de 6 mm de espesor. El techo, de forma rectangular dispuesto en forma de plano inclinado, es de chapa de acero galvanizado, está sustentado por once vigas metálicas reticuladas. El piso es de cemento pulido. Sobre uno de los muros longitudinales se ubica una tribuna con escalones de hormigón y cemento. En la figura 3, se observan fotografías del recinto.



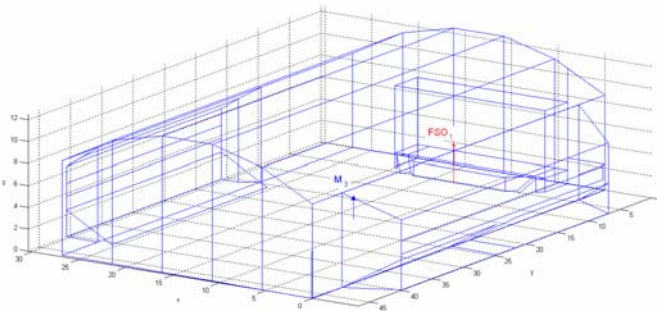
a)



b)

Figura 3: SUM colegio Dr. Antonio Nores: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto

2.4 S.U.M. Colegio de San José: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros son de ladrillo macizo de barro cocido de 0,3 m de espesor; interiormente solo los transversales poseen revoque cementicio de 20 mm de espesor. El techo, de geometría parabólica, es de chapa de acero galvanizada tipo sinusoidal; posee una altura mínima es de 7,8 m y máxima de 11,8 m. El piso es de baldosas de granito. Sobre uno de los muros longitudinales se ubica una tribuna construida con hormigón y ladrillos macizos. Sobre uno de los muros transversales se emplaza el “escenario”, de base rectangular ocupa una superficie de 75 m² (15 m x 5 m), sus muros perimetrales son de ladrillo macizo revocado interior y exteriormente. El techo es de chapa de acero galvanizada posee una altura de 5,5 m. El piso del escenario se encuentra elevado 1,2 m respecto del nivel SUM. En la figura 4, se observan fotografías del recinto.



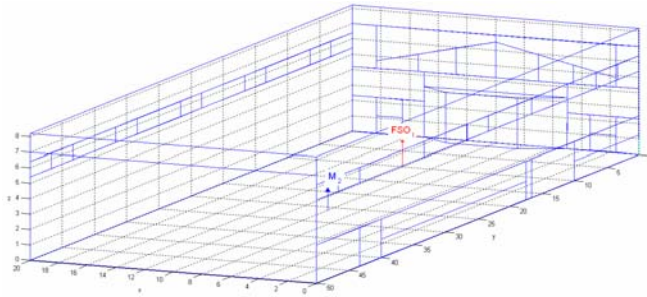
a)



b)

Figura 4: SUM Colegio de San José: a) modelo computacional; b) fotografía del interior del recinto

2.5 S.U.M. Cooperativa Eléctrica Arroyo Algodón: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros son de ladrillo macizo sin revocar terminados con impermeabilizante transparente; tantos los muros longitudinales como los transversales poseen columnas de hormigón armado 0,2 m de ancho separadas cada 3,33 m. El techo es de hormigón armado (estructuras pre-moldeadas y losas huecas de hormigón pretensado), está sustentado por vigas de hormigón armado dispuestas en sentido trasversal. El piso de baldosa de granito. En la figura 5, se observan fotografías del recinto.



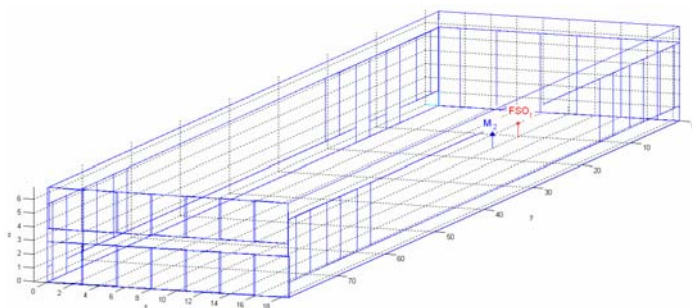
a)



b)

Figura 5: SUM Coop. Eléctrica Arroyo Algodón: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto

2.6 S.U.M. Comedor Universitario UNC: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros son de ladrillo macizo de barro cocido de 0,3 m de espesor con revoque de cemento de 2 cm de espesor. Cada muro longitudinal cuenta con 12 aberturas de madera de 3 m de alto y 1,5 m de ancho, equipadas con vidrios de 6 mm de espesor. El techo, de geometría plana, es de losa de hormigón y posee un cielorraso de yeso perforado en forma de 12 naves transversales, separadas por vigas dispuestas en forma transversal de 1 m de altura, 1 m de ancho y 18,5 m de largo. El cielorraso y la losa se encuentran separadas 1 m aproximadamente, dando lugar a cámaras de aire sobre el cielorraso. El piso de baldosas de granito pulido. En la figura 6, se observan fotografías del recinto.



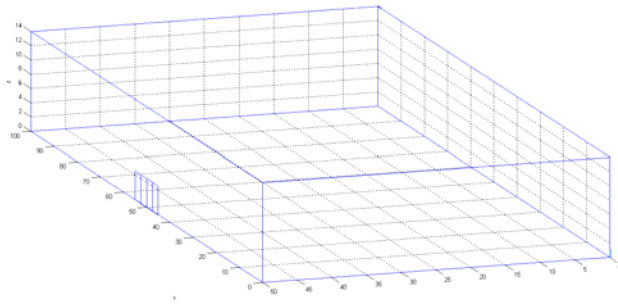
a)



b)

Figura 6: SUM Comedor Universitario, UNC: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto.

2.7 S.U.M. Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba: planta rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros longitudinales y transversales son de hormigón armado de 0,1 m de espesor. Cuenta perimetralmente con 36 aberturas de 1 m por 1 m, equipadas con vidrio de 4 mm de espesor. El techo es de hormigón armado (estructuras premoldeadas) y el piso es de cemento. En la figura 7, se observan fotografías del recinto.



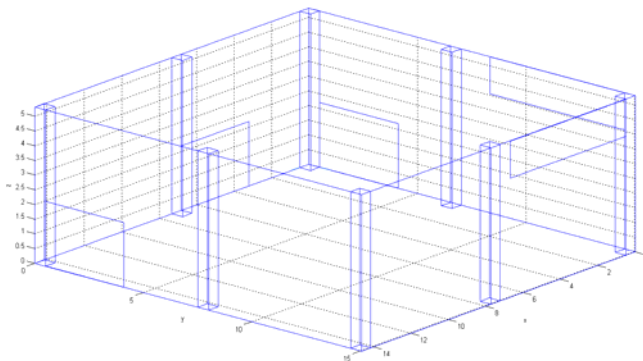
a)



b)

Figura 7: SUM Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba: a) modelo computacional; b) fotografía exterior del recinto

2.8 S.U.M. Escuela Dr. Domingo Cabred: Recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros son de hormigón armado con columnas del mismo material. El techo es de hormigón armado premoldeado. El piso es de baldosas de granito. Las aberturas son de carpintería de chapa con vidrios de 4 mm de espesor. En la figura 8, se observan fotografías del recinto.



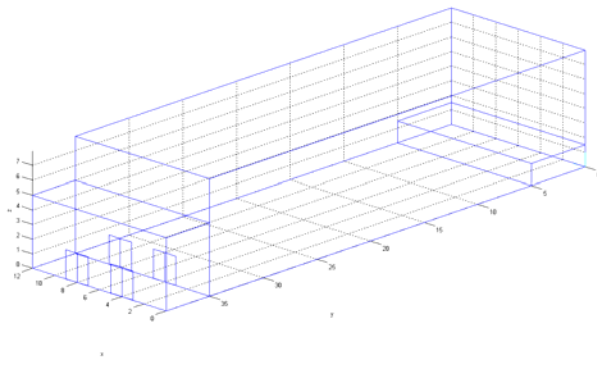
a)



b)

Figura 8: SUM Escuela Dr. Domingo Cabred: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto

2.9 S.U.M. Sala del Rey: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Posee muros de ladrillo macizo de 0,3 m de espesor y revoque de cemento de 20 mm de espesor. A partir de los 2,5 m de altura y hasta el nivel de cielorraso, los muros están recubiertos con panel rígido de lana de vidrio de 20 mm de espesor y 35 kg/m^3 de densidad. El techo es de chapa de acero galvanizada en formato dos aguas, presenta un cielorraso hermético de panel rígido de lana de vidrio de 20 mm de espesor y placas de roca yeso de 12,5 mm de espesor. Seguidamente, se encuentran difusores acústicos, tipo casquetes cilíndricos de madera, dispuestos en forma de arreglos matriciales de nueve elementos. Las puertas son de chapa de acero rellenas con panel rígido de lana de vidrio de 50 mm de espesor. El piso es de baldosas de porcelanato. En la figura 9, se observan fotografías del recinto.

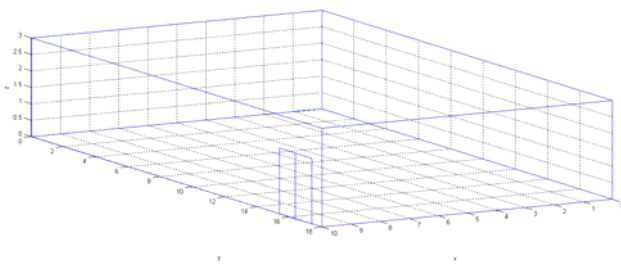


a)

b)

Figura 9: SUM Sala del Rey: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto

2.10 Aula Magna UTN FRC: recinto cerrado de base rectangular y geometría paralelepípedo rectangular ú ortoedro. Los muros son de ladrillo macizo de 0,3 m de espesor con revoque de cemento de 20 mm de espesor; combinados en algunos sectores con hormigón armado. Una de las paredes longitudinales cuenta con aberturas de carpintería de aluminio equipadas con paños de vidrio de 6 mm de espesor y cortinado doble de tela de algodón. El techo es de hormigón armado con vigas del mismo material de 1 m por 0,4 m, dispuestas en sentido longitudinal. Las puertas son de madera. El piso está recubierto con alfombra tipo bucle de 10 mm de espesor. Las localidades se presentan en dos naves de 22 filas cada una, con 10 butacas por fila. Las mismas poseen respaldo y base de goma espuma con terminación en cuero. En la figura 10, se observan fotografías del recinto.



a)

b)

Figura 10: Aula Magna UTN FRC: a) modelo computacional; b) fotografía interior del recinto

3 METODOLOGIA DE MEDICION

Las mediciones de RIR fueron efectuadas siguiendo las directrices que establece la norma ISO 3382. Todas las mediciones se efectuaron sin presencia de público. Las curvas de decrecimiento fueron obtenidas mediante la integración inversa del cuadrado de la respuesta impulsiva del recinto (método de la Respuesta Impulsiva Integrada, IIR, [Schröder 1965](#), [ISO 3382](#)) a través de dos técnicas: la primera, denominada técnica directa, utiliza como señal de excitación ráfagas de ruido (noise burst) filtrados por bandas de frecuencia ([Schröder 1965](#)). Esta técnica, tiene como desventaja el bajo nivel de relación señal ruido ([Vörländer 1994](#)). La segunda, denominada técnica indirecta, aplica entre otras la deconvolución de señales, donde la RIR es calculada deconvolucionando una señal de excitación apropiada con la respuesta de la señal ([ISO 3382](#), [Farina 2000](#)). Esta técnica tiene como ventaja el alto nivel de relación señal ruido que se obtiene como consecuencia del empleo de señales determinísticas de larga duración ([Vanderkooy 1994](#), [ISO 3382](#)); permitiendo realizar mediciones en ambientes con altos niveles de ruido de fondo y posibilitando eliminar de la RIR, distorsiones no lineales introducidas por el sistema de medición ([Farina 2000](#), [Ćirić 2007](#)). Además, los sistemas basados en ésta técnica, a diferencia de la anterior, permiten aplicar en posprocesamiento diferentes métodos de reducción de ruido. Sin embargo, debe evitarse por lo general la aplicación de cualquiera de estos métodos. Para ésta segunda técnica, se utilizaron tres tipos de señales de excitación:

- 1.- Barrido en frecuencias de una señal sinusoidal que incrementa proporcionalmente con el tiempo (Lineal Sweep, l-sweep), ([Poletti 1988](#)).
- 2.- Barrido en frecuencia de una señal sinusoidal que incrementa exponencialmente con el tiempo (Exponential Sweep, e-sweep), ([Farina 2000](#)).
- 3.- Secuencia de máxima longitud (Maximum Length Sequence, MLS), ([Borish, 1983](#)).

En la Tabla 4, se lista el método y la técnica de medición aplicado para el cálculo de los parámetros acústicos que se presentan en la sección 4.

| Código | Recinto | Método | Técnica |
|--------|--|--------|----------------------|
| 1 | Aula 311 UTN FRC | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 2 | Parroquia Sagrado Corazón de Jesús | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 3 | S.U.M Colegio Dr. Antonio Nores | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 4 | S.U.M Colegio de San José | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 5 | S.U.M Cooperativa Eléctrica Arroyo Algodón | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 6 | S.U.M Comedor Universitario | IIR | Indirecta, e-sweep |
| 7 | S.U.M Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba | IIR | Directa, noise burst |
| 8 | S.U.M Escuela Dr. Domingo Cabred | IIR | Directa, noise burst |
| 9 | S.U.M Sala del Rey | IIR | Directa, noise burst |
| 10 | Aula Magna UTN FRC | IIR | Directa, noise burst |

Tabla 4: Método y técnica de medición aplicados para el cálculo de parámetros acústicos

3.1 Sistemas de medición

Los sistemas de medición utilizados para ambas técnicas se detallan en Tablas 5 y 6.

| Descripción | Marca/Modelo |
|-------------------------------|------------------------------|
| Medidor de nivel sonoro | Brüel & Kjær, 2231 |
| Software de acústica de salas | Brüel & Kjær, BZ7104, BZ7109 |

| | |
|--|--------------------|
| Micrófono electrostático | Brüel & Kjær, 4155 |
| Calibrador sonoro de referencia | Brüel & Kjær, 4231 |
| Cabeza y torso artificial | Brüel & Kjær, 4128 |
| Amplificador de audio | Brüel & Kjaer, |
| Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro) | Cintra, FSO |
| Auriculares | Beyer dynamics |
| Distanciómetro Laser | Leica, D5 |

Tabla 5: Sistema de medición utilizado para la medición de RIR por técnica directa.

| Descripción | Marca/Modelo |
|---|--|
| Placa de adquisición de sonido (44.1, 48 kHz, 16, 20 bits, full dúplex) | Realtek, HD Audio E-MU, 0404 |
| Software de acústica de salas | Brüel & Kjær, 7841 (Dirac); Aurora 3.1 |
| Micrófono electrostático | Brüel & Kjær, type 4133 |
| Pre-amplificador para micrófono, 200V | Brüel & Kjær, type 2804 |
| Calibrador sonoro de referencia | Brüel & Kjær, 4231 |
| Cabeza y Torso Artificial | Brüel & Kjær, type 4128 |
| Amplificador de potencia de medición | Cintra, MAPA D-ACL (Clase D) |
| Amplificador de audio de potencia | Samson, Servo 300 |
| Sistema de gestión de altavoces | dBx, Drive Rack PA+ |
| Consola de mezcla 12 CH | Behringer, Eurorack UB-1204 FX-PRO |
| Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro) | Cintra, OSS (diseño y desarrollo) |
| PC Notebook | CPU Intel Core2 Duo, 2 Ghz, 2 GB RAM |
| Auriculares | Sennheiser, HD570 |
| Distanciómetro Laser | Leica, D5 |

Tabla 6: Sistema de medición utilizado para la medición de RIR por técnica indirecta

3.2 Posiciones de medición

Dependiendo de las dimensiones de los recintos se seleccionaron las posiciones de medición. El procedimiento aplicado considero para recintos pequeños como 1 y 8, dos posiciones de fuente y tres posiciones de micrófono; obteniendo seis posiciones de combinaciones fuente-micrófono. Mientras que para recintos medianos y grandes, como 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 dos posiciones de fuente y seis posiciones de micrófono; obteniendo doce posiciones de combinaciones fuente-micrófono.

3.3 Promediación espacial

Siguiendo las recomendaciones que plantea la norma ISO 3382, se efectuó la promediación espacial de los parámetros acústicos a través del promedio aritmético de los valores para las posiciones de medición seleccionadas.

3.4 Cálculo de incertidumbre de medición

Para el cálculo de la incertidumbre de la medición se utilizó lo establecido en la norma ISO 3382, la cual explicita que la repetibilidad de las mediciones usando el método de respuesta impulsiva integrada es comparable en el mismo orden de magnitud con el promedio de diez (10) mediciones a través del método de ruido interrumpido. Normalmente no es necesaria ninguna promediación adicional para disminuir estadísticamente la incertidumbre de la medición.

4 PARAMETROS ACÚSTICOS DE RECINTOS

En Tablas 7 a 16, se presentan los resultados como promediación espacial de los parámetros acústicos derivados de las RIR para cada recinto.

| EDT [s] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 2,88 | 2,85 | 2,25 | 1,99 | 1,79 | 1,44 |
| 2 | 5,43 | 6,16 | 6,70 | 6,16 | 5,32 | 3,48 |
| 3 | 4,08 | 5,99 | 8,67 | 8,73 | 6,31 | 3,32 |
| 4 | 6,32 | 7,98 | 9,20 | 7,79 | 5,92 | 3,51 |
| 5 | 14,72 | 14,99 | 11,09 | 8,21 | 5,51 | 2,91 |
| 6 | 3,01 | 2,92 | 2,73 | 3,17 | 3,22 | 2,30 |
| 7 | 13,15 | 13,09 | 14,34 | 12,52 | 8,19 | 3,97 |
| 8 | 4,42 | 4,92 | 5,95 | 6,12 | 5,63 | 3,36 |
| 9 | 1,45 | 1,01 | 1,43 | 1,46 | 1,52 | 1,43 |
| 10 | 1,41 | 1,02 | 0,81 | 0,76 | 0,82 | 0,77 |

Tabla 7: Tiempo de decaimiento temprano (EDT)

| T20 [s] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 3,51 | 3,41 | 2,47 | 2,01 | 1,83 | 1,50 |
| 2 | 6,29 | 6,88 | 6,81 | 6,22 | 5,29 | 3,61 |
| 3 | 3,70 | 6,82 | 8,99 | 8,74 | 6,75 | 3,90 |
| 4 | 6,51 | 8,47 | 9,93 | 9,04 | 6,47 | 4,18 |
| 5 | 7,66 | 6,81 | 6,89 | 6,16 | 4,75 | 2,96 |
| 6 | 3,65 | 3,40 | 3,17 | 3,41 | 3,51 | 2,70 |
| 7 | 12,16 | 12,58 | 14,90 | 13,30 | 8,34 | 3,68 |
| 8 | 4,53 | 5,01 | 6,02 | 7,63 | 7,42 | 3,19 |
| 9 | 1,34 | 1,08 | 1,43 | 1,51 | 1,57 | 1,46 |
| 10 | 1,82 | 1,02 | 0,85 | 0,81 | 0,85 | 0,79 |

Tabla 8: Tiempo de reverberación (T_{20})

| T30 [s] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 3,70 | 3,61 | 2,50 | 2,04 | 1,85 | 1,51 |
| 2 | 6,46 | 6,88 | 6,72 | 6,21 | 5,37 | 3,70 |
| 3 | 3,81 | 5,28 | 6,94 | 8,41 | 6,82 | 4,17 |
| 4 | 6,54 | 8,48 | 10,20 | 9,15 | 6,59 | 4,41 |
| 5 | 7,75 | 6,72 | 7,09 | 6,10 | 4,59 | 2,90 |
| 6 | 3,67 | 3,49 | 3,26 | 3,50 | 3,55 | 2,81 |
| 7 | 12,78 | 12,45 | 14,62 | 12,91 | 8,44 | 3,53 |
| 8 | 4,55 | 5,12 | 6,14 | 7,71 | 7,51 | 3,26 |
| 9 | 1,43 | 1,14 | 1,56 | 1,59 | 1,63 | 1,57 |
| 10 | 1,91 | 1,06 | 0,93 | 0,84 | 0,89 | 0,86 |

Tabla 9: Tiempo de reverberación (T_{30})

| T40 [s] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 19,01 | 8,34 | 15,03 | 16,98 | 7,20 | 11,88 |
| 2 | 6,32 | 6,68 | 6,77 | 6,10 | 5,34 | 3,68 |
| 3 | 9,38 | 5,65 | 7,27 | 8,10 | 9,60 | 12,14 |
| 4 | 8,59 | 8,99 | 9,94 | 9,92 | 7,83 | 4,37 |
| 5 | 9,01 | 7,89 | 7,54 | 6,40 | 5,17 | 3,42 |
| 6 | 5,69 | 5,68 | 3,19 | 3,36 | 3,50 | 2,67 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - | - |

Tabla 10: Tiempo de reverberación (T_{40})

| C50 [dB] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|-----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | -11,66 | -7,24 | -5,82 | -3,35 | -3,00 | -1,62 |
| 2 | -11,47 | -6,83 | -6,32 | -2,98 | -4,81 | -0,52 |
| 3 | -7,01 | -6,30 | -6,33 | -7,39 | -10,39 | -2,18 |
| 4 | -9,32 | -7,36 | -8,38 | -8,34 | -5,55 | -3,04 |
| 5 | -15,30 | -17,32 | -14,70 | -14,55 | -14,79 | -14,55 |
| 6 | -2,26 | -1,30 | -0,45 | 0,31 | -0,97 | 1,07 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - | - |

Tabla 11: Índice energético temprano/tardío — Claridad (C_{50})

| C80 [dB] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|-----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | -5,10 | -3,77 | -2,29 | -0,60 | -0,36 | 0,85 |
| 2 | -9,43 | -11,30 | -10,23 | -6,59 | -6,80 | -4,19 |
| 3 | -4,94 | -3,90 | -4,62 | -5,54 | -6,30 | -0,41 |
| 4 | -5,69 | -7,59 | -7,69 | -7,04 | -4,84 | -2,52 |
| 5 | -8,84 | -15,38 | -13,94 | -12,62 | -13,41 | -11,58 |
| 6 | -2,90 | -1,63 | -1,08 | -1,48 | -1,87 | 0,61 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | -7,22 | -5,63 | -7,24 | -7,95 | -6,09 | -3,07 |
| 9 | -2,35 | 0,64 | 3,21 | 3,82 | 3,67 | 3,32 |
| 10 | -0,91 | 1,45 | 3,98 | 5,06 | 3,35 | 4,93 |

Tabla 12: Índice energético temprano/tardío — Claridad (C_{80})

| D [%] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|---------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 0,13 | 0,19 | 0,22 | 0,34 | 0,33 | 0,40 |
| 2 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,15 | 0,13 | 0,22 |
| 3 | 0,16 | 0,24 | 0,24 | 0,19 | 0,15 | 0,40 |
| 4 | 0,17 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,20 | 0,29 |
| 5 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 6 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,35 | 0,31 | 0,41 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 0,12 | 0,14 | 0,09 | 0,12 | 0,13 | 0,24 |
| 9 | 0,18 | 0,35 | 0,52 | 0,52 | 0,47 | 0,54 |
| 10 | 0,21 | 0,38 | 0,72 | 0,58 | 0,49 | 0,55 |

Tabla 13: Definición (D)

| Ts [ms] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 241,03 | 222,52 | 169,79 | 138,53 | 128,16 | 102,48 |
| 2 | 422,33 | 525,80 | 520,53 | 450,90 | 406,43 | 260,60 |
| 3 | 293,10 | 363,70 | 519,10 | 560,27 | 441,70 | 332,03 |
| 4 | 408,87 | 554,38 | 640,88 | 551,42 | 390,27 | 226,37 |
| 5 | 1151,60 | 1318,23 | 976,30 | 686,77 | 510,30 | 312,07 |
| 6 | 221,72 | 178,53 | 168,97 | 192,12 | 200,77 | 132,12 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 310,6 | 360,8 | 440,3 | 442,6 | 380,9 | 221,8 |
| 9 | 123,7 | 95,2 | 72,6 | 82,4 | 93,4 | 75,4 |
| 10 | 124,5 | 80,7 | 69,4 | 59,6 | 71,3 | 62,5 |

Tabla 14: Centro de tiempo (Ts)

| SNR [dB] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|-----------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 78,22 | 77,56 | 70,44 | 67,22 | 51,33 | 52,33 |
| 2 | 35,00 | 34,33 | 33,33 | 32,33 | 32,00 | 28,33 |
| 3 | 18,33 | 20,67 | 21,67 | 22,33 | 25,67 | 24,33 |
| 4 | 30,67 | 30,67 | 26,33 | 26,67 | 31,50 | 34,50 |
| 5 | 27,33 | 25,33 | 27,33 | 28,00 | 26,67 | 20,33 |
| 6 | 29,83 | 33,67 | 38,33 | 43,17 | 42,17 | 40,33 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - | - |

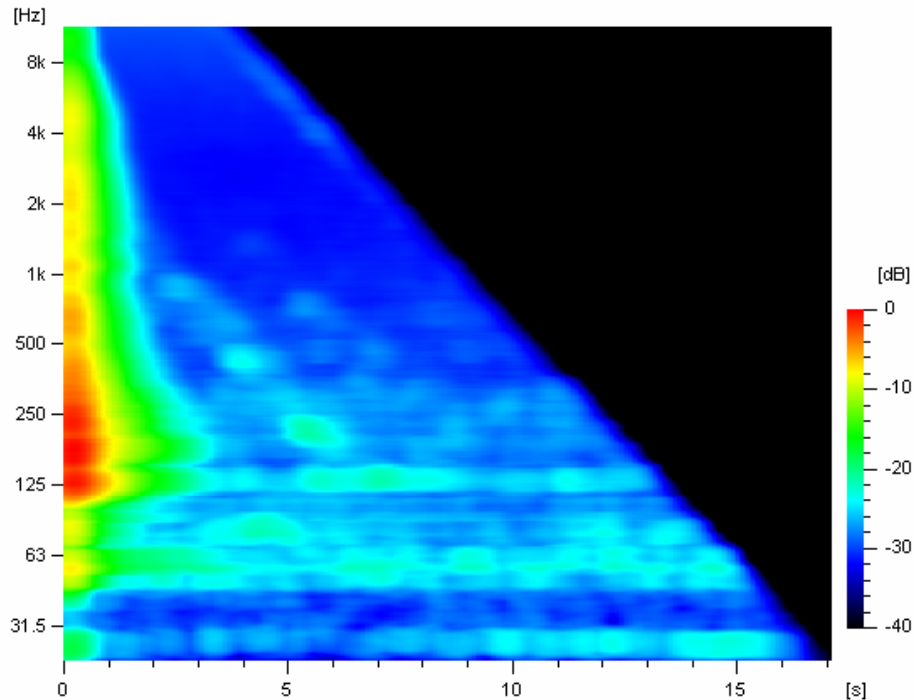
Tabla 15: Relación señal ruido (SNR)

| INR [dB] | Bandas de Frecuencia por Octava [Hz] | | | | | |
|----------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Código | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1 | 89,67 | 90,11 | 85,11 | 82,67 | 67,11 | 69,11 |
| 2 | 46,33 | 46,33 | 44,67 | 44,33 | 44,33 | 42,67 |
| 3 | 34,67 | 34,67 | 34,67 | 35,33 | 39,67 | 41,00 |
| 4 | 42,67 | 41,33 | 36,33 | 37,50 | 43,33 | 48,33 |
| 5 | 38,67 | 37,33 | 39,33 | 40,00 | 39,67 | 35,67 |
| 6 | 43,33 | 47,33 | 52,50 | 57,17 | 55,50 | 55,67 |
| 7 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - | - |

Tabla 16: Relación Impulso Ruido (INR)

5 ESPECTROGRAMAS DE RIR

En figuras 11 a 16 se observan las espectrometrías derivadas de las RIR medidas por técnica indirecta, correspondientes a una única combinación fuente-micrófono seleccionada por recinto. Las coordenadas de la fuente sonora omnidireccional (FSO_x) y el micrófono (M_x), se indican en Tabla 3 y en modelos computacionales de la sección 2.

Figura 11: Aula 311 UTN FRC. FSO_1-M_5

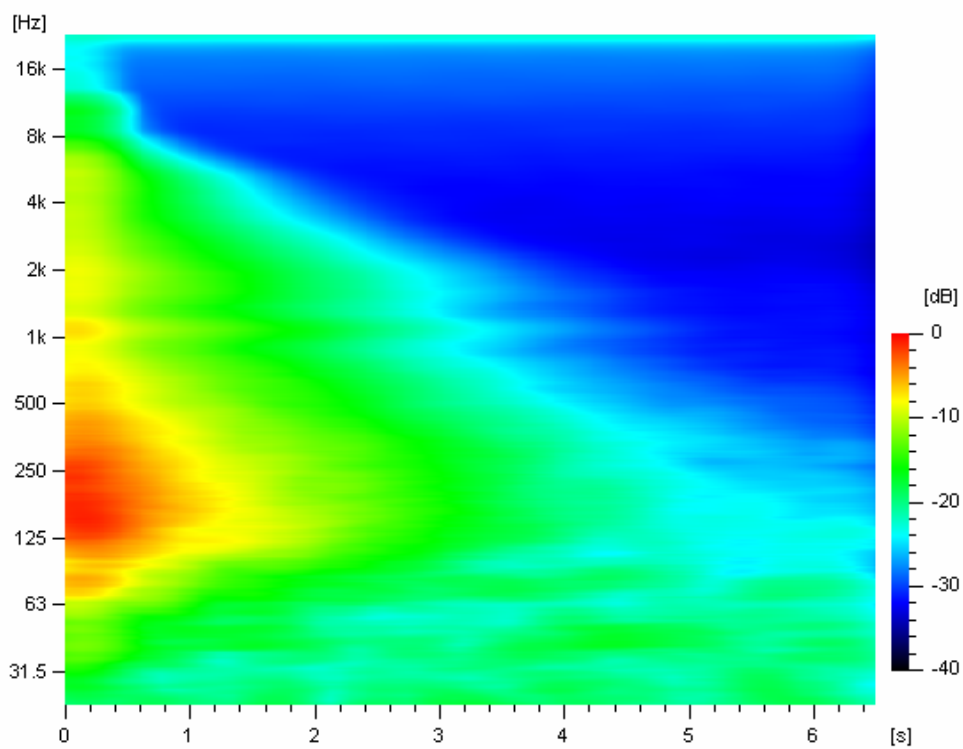


Figura 12: Parroquia Sagrado Corazón de Jesús. FSO₁—M₂

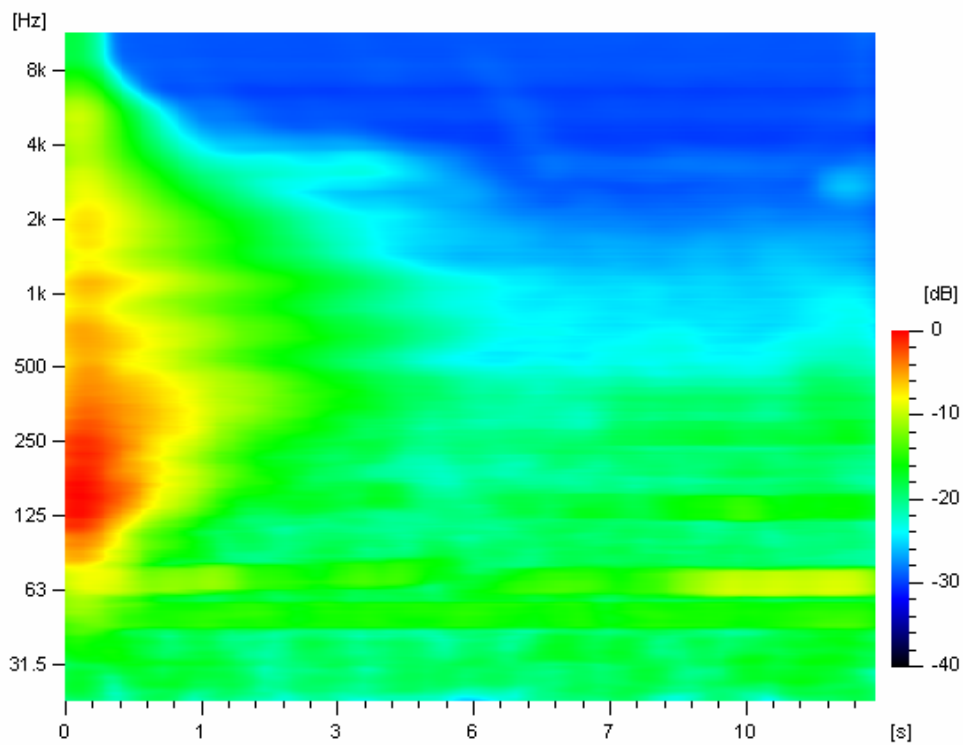
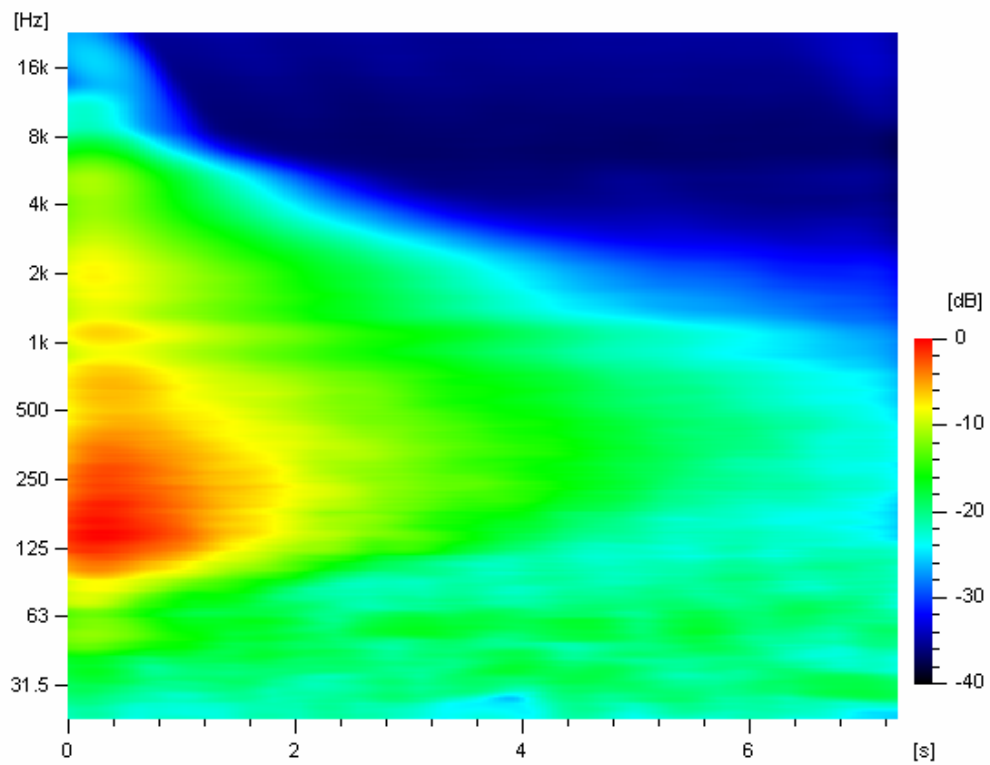
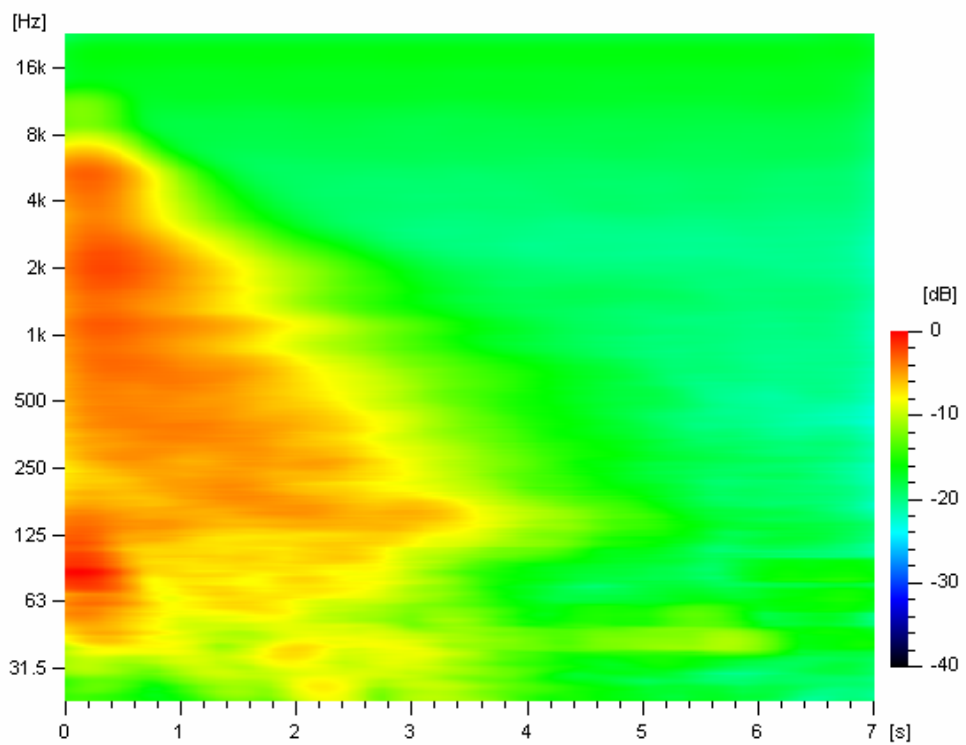


Figura 13: SUM Colegio Dr. Antonio Nores. FSO₁—M₃

Figura 14: SUM Colegio de San José. FSO₁—M₃Figura 15: SUM Arroyo Algodón FSO₁—M₂

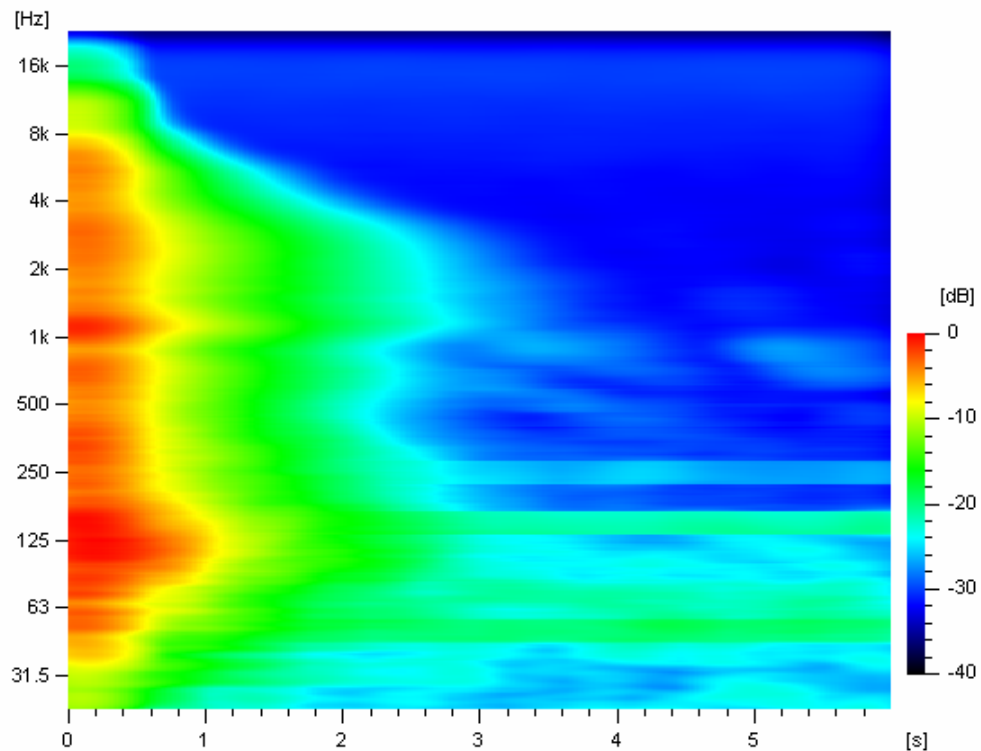


Figura 16: SUM Comedor Universitario UNC. FSO₁—M₂

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se presentan los resultados de un conjunto de mediciones de RIR de espacios arquitectónicos con diferentes características acústicas, efectuadas según norma ISO 3382. El propósito es difundir los resultados de dichas mediciones realizadas por el CINTRA con motivo de iniciar la construcción de una base de datos a nivel nacional e internacional que permita profundizar la investigación científica en temas referidos a características de campos sonoros de diferentes recintos, distribución de modos normales, simulación acústica de realidad acústica virtual, diseño acústico arquitectónico, técnicas y métodos de medición en acústica de salas, entre otros.

El trabajo a futuro, considera ampliar la base datos con mediciones de otros recintos con la inclusión de parámetros acústicos derivados de respuestas impulsivas de recintos binaurales (BRIR) y modos de resonancia.

7 REFERENCIAS

- Borish, J. and Angell, J. An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudo-random noise, *Journal Audio Engineering Society*, pp. 478, 1983
- Ciric, D G. Comparison of influence of distortion in mls and sine sweep technique. *Proc. of 19th International Congress on Acoustics (ICA2007)*, 2-7 September, Madrid 2007
- Farina, A. Simultaneous measurements of impulse response and distortion with a sweep-sine technique., *Proc. 108th Convention of Audio Engineering Society*, preprint 5093, Paris, 2000
- Ferreira S., Esquinas P., Orecchia I., Elías J. Diseño y construcción de una cadena de instrumentación electroacústica para la medición de la respuesta al impulso de recintos

- según norma ISO 3382”. *Mecánica Computacional*, Vol XXVIII, pp. 63-72. Editorial AMCA. Actas del XXVIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones (ENIEF 2009). Ciudad de Tandil, noviembre de 2009.
- Ferreira, S. P., Elías, M., “Análisis comparativo de parámetros acústicos de recintos utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso”. *Procedimientos 5^{to} Congreso Iberoamericano de Acústica*. Paper A032, Santiago de Chile, 25-28 de Octubre, 2006
- IRAM 4109-1:2011 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1 – Salas de espectáculos (documento en estudio y revisión).
- IRAM 4109-2:2009 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2 – Tiempo de reverberación de recintos comunes (documento en estudio y revisión).
- ISO 3382:1975 (E), Acoustics—Measurement of reverberation time in auditoria
- ISO 3382:1997 (E), Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters
- ISO 3382-1:2009 (E), Acoustics—Measurements of room acoustics parameters-Part 1: Performance spaces”
- ISO 3382-2:2008 (E), Acoustics—Measurements of room acoustics parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms
- ISO/CD 3382-3 Acoustics—Measurements of room acoustics parameters - Part 3: Open plan spaces” (under development)
- Poletti M, Linearly swept frequency measurements, time-delay spectrometry, and the Wigner distribution. *Journal Audio Engineering Society*, vol. 36, n. 6, 1988 June, pp. 457-468.
- Schröder M., “New method of measuring reverberation time”, *Journal Acoustical Society of America*, 37:409-412, 1965
- Vanderkooy J., Aspects of MLS measuring systems. *Journal Audio Engineering Society* vol. 42, n. 4, 1994 April, pp. 219-231.
- Vorländer, M. and Bietz, H. Comparison of methods for measuring reverberation time, *Acustica*, 80:205-215, 1994